

СМОЖЕТ ЛИ ЭНЕРГОПЕРЕХОД ОСТАНОВИТЬ ГЛОБАЛЬНОЕ ПОТЕПЛЕНИЕ И ПОЧЕМУ ТАК СИЛЬНО ОШИБАЮТСЯ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ПРОГНОЗЫ?¹

© 2022 г. В. В. Клименко^{а, с, *}, А. В. Клименко^б, А. Г. Терешин^{а, с}, О. В. Микушина^{а, с}

^аНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

^бНациональный исследовательский технологический университет “МИСиС”,
Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049 Россия

^сИнститут энергетических исследований РАН, Нагорная ул., д. 31, корп. 2, Москва, 117186 Россия
*e-mail: nilgpe@mpei.ru

Поступила в редакцию 19.05.2021 г.

После доработки 15.06.2021 г.

Принята к публикации 23.06.2021 г.

Работа посвящена анализу современного состояния исследований в области прогнозирования развития мировой энергетики и ее воздействия на атмосферу и климат планеты. Продемонстрированы преимущества историко-экстраполяционного подхода к прогнозированию развития мировой энергетики и других источников антропогенного воздействия на атмосферу и климат планеты, а также всестороннего учета природных климатических факторов и особенностей естественной изменчивости глобального климата. Показано, что в результате генетического (основанного на закономерностях исторического развития) прогноза развития мировой энергетики, разработанного в МЭИ более 30 лет назад, была представлена адекватная картина изменения мирового энергопотребления и его углеродной интенсивности. Полученные с его помощью оценки кумулятивной эмиссии диоксида углерода за период 1990–2020 гг. в точности соответствуют реальным данным, следующим из мировой энергетической статистики². Этот подход позволил предсказать существенную трансформацию мирового энергетического баланса (энергопереход) в начале текущего столетия, выразившуюся в возрастающей роли безуглеродных источников энергии, в первую очередь возобновляемых. Расчеты, выполненные в 1990-е годы на комбинированной климатической модели МЭИ, сочетающей принципы динамического и статистического моделирования глобальной климатической системы и учитывающей действие естественных климатических факторов и внутренние особенности климатической системы, с использованием генетического прогноза мирового потребления энергии и эмиссии диоксида углерода, за период 1990–2020 гг. показали обнадеживающее соответствие данным наблюдений за динамикой изменения глобальной температуры. Результаты расчетов показывают, что большинство наиболее радикальных сценариев энергопотребления и соответствующей эмиссии диоксида углерода неосуществимы в реальности и выполненные по ним модельные оценки глобальных климатических изменений также крайне маловероятны. Вместе с тем констатируется, что для достижения целей предотвращения повышения среднеглобальной температуры свыше 2°C по сравнению с доиндустриальным периодом, наряду со снижением потребления органического топлива, необходимо развивать в значительных масштабах и технологии поглощения углекислого газа – как биологические (лесовосстановление, охрана от лесных пожаров и пр.), так и геологические (прямое захоронение).

Ключевые слова: мировая энергетика, глобальная климатическая система, объемы и структура потребления энергии, эмиссия и поглощение диоксида углерода, выбросы серы, естественные климатические факторы, прогнозы, сценарии, модели

DOI: 10.1134/S0040363622030067

Глобальное потепление надежно зафиксировано по результатам метеорологических измерений как расчетами среднеглобальной температу-

ры, так и наблюдениями за температурным режимом в масштабе континентов и отдельных регионов по всему земному шару. В настоящее время счита-

¹ Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 21-79-30013).

² В работе использованы данные Статистической и Демографической служб ООН (UN, <https://data.un.org/>), компании British Petroleum (BP, <https://www.bp.com>), Информационно-аналитического центра по диоксиду углерода США (CDIAC, <http://cdiac.ornl.gov>), МГЭИК (<http://www.ipcc.ch>), Национальной службы по атмосфере и океану США (NOAA/ESRL, <ftp://aftp.cmdl.noaa.gov/products/trends/co2/>), Центра климатических исследований Университета Восточной Англии (CRU, <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/temperature/>), Всемирного института улавливания и захоронения углерода (GCCSI, <http://www.globalccsinstitute.com>).

ется твердо установленным (с вероятностью более 95%), что наблюдаемое потепление почти полностью обусловлено различными видами деятельности человека, из которых важнейшими являются сжигание органического топлива, сельское и лесное хозяйство [1]. Одновременно предполагается, что все другие возможные климатические факторы (изменение солнечной активности, деятельность вулканов, внутренняя естественная нестабильность климатической системы) могут вносить лишь незначительный вклад в наблюдаемый температурный эффект [1].

Поскольку любые виды деятельности человека испытывают сильное влияние климата, то долгосрочные прогнозы его изменений играют существенную роль в развитии мировой экономики. Эта роль заметно возросла в последние годы, когда в соответствии с заключенным в 2015 г. Парижским соглашением об охране климата мировое сообщество приступило к реализации грандиозной программы, направленной на удержание среднеглобальной температуры в пределах значительно ниже 2°C относительно так называемой доиндустриальной эпохи (1850–1900 гг.).

Решающая роль в установлении верных ориентиров в движении к указанной цели, безусловно, принадлежит Межправительственной группе экспертов по изменению климата (МГЭИК), созданной под эгидой ООН более 30 лет назад и призванной снабжать мировое сообщество наиболее достоверной информацией по всем аспектам проблемы, включая собственно климатическое прогнозирование. Каким же образом получилось так, что организация, собравшая несколько тысяч видных специалистов, удостоенная за свою деятельность Нобелевской премии мира за 2007 г. и получившая право практически безальтернативного суждения, уже более трех десятилетий является источником ложных, вызывающих тревогу, побуждающих к неверным, а подчас и к разрушительным шагам по реформированию мировой экономики климатических прогнозов, не имеющих никакого отношения к реальности? Для ответа на этот очень непростой вопрос придется заново проанализировать события почти сорокалетнего периода, в течение которого проблема сначала возможного, а теперь практически бесспорного антропогенного изменения климата стала постоянной и к тому же важнейшей частью мировой повестки в последние годы.

Ранее авторы уже не раз обращались к этой теме [2–4] и назвали основные причины неудач в построении долгосрочных климатических прогнозов:

- неточные представления о функционировании глобальной климатической системы, результатом которых является использование завышенных значений чувствительности климата к изменению

концентрации парниковых газов в атмосфере. Следует напомнить, что чувствительность климата — это ключевой параметр, представляющий собой повышение средней глобальной температуры при удвоении концентрации углекислого газа. По нынешним оценкам авторов, такая чувствительность находится в диапазоне 2.2–2.5°C, в то время как МГЭИК [1] допускает гораздо более широкий диапазон (1.5–4.5°C). Разумеется, наиболее драматические сценарии потепления, а по сути только они и становятся достоянием широкой общественности, соответствуют максимальным значениям чувствительности, которые не находят подтверждения ни в данных современных инструментальных метеорологических наблюдений, ни в сведениях о климатах отдаленного прошлого;

- игнорирование естественных факторов климата (солнечная и вулканическая активность, внутренняя неустойчивость климатической системы). Положение начинает меняться только сейчас, и МГЭИК в своем Шестом оценочном докладе, предварительная версия которого была представлена в августе 2021 г., а выход запланирован на 2022 г., намерена, наконец, принять во внимание приближение очередного векового минимума солнечной активности и “научить” модели общей циркуляции воспроизводить долгопериодные колебания, такие как Атлантическая мультидекадная осцилляция (АМО) [5, 6];

- ошибочные представления о тенденциях развития мировой энергетики, недооценка быстрого развития природоохранной деятельности и мер по защите климата, что ведет к завышенным оценкам выбросов парниковых газов и загрязняющих веществ в атмосферу.

В этой статье авторы сосредоточат свое внимание в основном на причинах, связанных со сжиганием органического топлива — главного антропогенного источника поступления парниковых газов в атмосферу, ответственного более чем за 70% их общей эмиссии, в том числе за 90% выбросов углекислого газа [1].

Долгосрочные прогнозы изменения климата, построенные в 80-х годах прошлого века, в своем большинстве не выдержали проверку временем и обнаружили заметное расхождение с реальными данными³ [7]. На рис. 1, а приведено сопоставление прогнозов изменения среднеглобальной температуры, представленных в Первом оценочном докладе МГЭИК (1990) [8], а также выполненного группой ученых АН СССР [9], в состав которой в то время входили, по сути, все виднейшие отечественные специалисты.

³ В настоящей статье используются глобально осредненные температуры воздуха, подготовленные специалистами CRU по результатам инструментальных наблюдений.

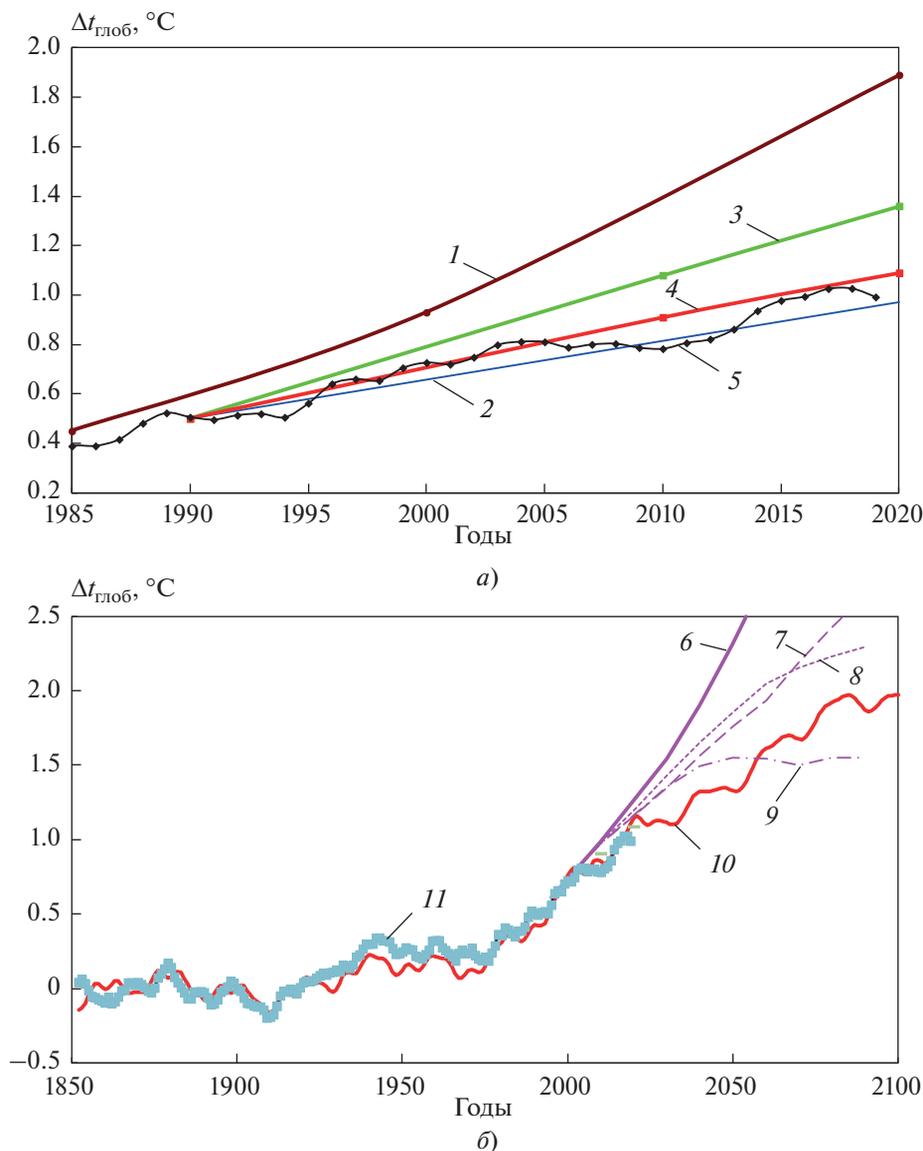


Рис. 1. История и прогнозы изменения средней глобальной температуры воздуха $\Delta t_{\text{глоб}}$ (в отклонениях от доиндустриальных значений).

a – прогнозы: 1 – М.И. Будыко и Ю.А. Израэля [9]; 2 – В.В. Клименко и др. [10]; сценарии МГЭИК [8]: 3 – инерционный Business-as-Usual; 4 – альтернативные В/С/D; 5 – данные CRU [7], сглаженные 5-летним скользящим средним; *б* – сценарии МГЭИК [1, 14]: 6 – RCP 8.5; 7 – RCP 6.0; 8 – RCP 4.5; 9 – RCP 2.6; 10 – прогноз МЭИ [11]; 11 – данные CRU, сглаженные 5-летним скользящим средним

Допущенные на 30-летнем (1990–2020 гг.) горизонте ошибки в оценке масштабов изменения среднеглобальной температуры поражают воображение, поскольку в максимальном варианте МГЭИК (линия 3 на рис. 1, *a*) прогноз (в отклонениях от уровня 1985 г.) превосходит реально достигнутые значения почти в 2 раза, а в варианте АН СССР (линия 1 на рис. 1, *a*) почти в 3 (!) раза. Более того, весь диапазон неопределенности прогнозов МГЭИК лежит выше реальных значений. Почти четверть века спустя после Первого увидев свет Пятый и к настоящему времени последний оценочный доклад МГЭИК, в котором представ-

лен набор из четырех *репрезентативных* сценариев дальнейшего потепления (см. рис. 1, *б*). Поскольку в качестве отправной точки нового прогноза был избран 2005 г., то имеется возможность оценить его полезность уже сейчас. Поразительно, но даже на таком коротком, длиной всего 16 лет, горизонте выясняется, что ни один из представленных вариантов, включая самый гуманный по отношению к климату RCP 2.6, не имеет никакого отношения к реальной эволюции глобальной температуры, значительно преувеличивая масштаб ожидаемого потепления. В том, что корректное предсказание будущих климатических изменений

все-таки возможно, в какой-то мере могут убедить результаты собственных прогнозов авторов, которые в течение последних 30 лет успешно описали не только тренды, но и междекадные колебания температуры (см. рис. 1).

Причина подобных расхождений с реальностью кроется, прежде всего, в том, что в прогнозах как МГЭИК, так и АН СССР не были учтены проявившиеся на рубеже веков новые тенденции развития энергетики — главного антропогенного виновника изменения климата. Эти тенденции в момент разработки прогнозов едва просматривались, но позже набрали силу и превратились в заметные факторы формирования климата. Еще одна причина расхождения прогнозов с данными метеорологических наблюдений связана с выявлением роли ранее неизвестных колебаний в климатической системе, способных вызывать значимый температурный эффект на относительно небольших (от единиц до нескольких десятков лет) промежутках времени. Понятно, что этот природный фактор не учитывался в прогнозах конца прошлого века.

Далее эти причины будут рассмотрены более подробно.

МИРОВОЕ ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ И ЭМИССИЯ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Успех построения прогнозов долгосрочных изменений климата во многом определяется точностью предсказания концентрации диоксида углерода в атмосфере, которая, в свою очередь, в значительной мере зависит от антропогенной эмиссии CO_2 . Однако в последнюю четверть века сообщество климатологов вместо прогнозов динамики антропогенного воздействия на климатическую систему предпочитает пользоваться весьма произвольными сценариями [1, 12–14]. В последние 20 лет наибольшую популярность имели, пожалуй, сначала сценарии A1B, B2, а затем также RCP 8.5 (особенно первый и последний), которые значительно преувеличивают размер антропогенной эмиссии углерода и, соответственно, реакцию климатической системы как на глобальном, так и на региональном уровне. В результате мировое сообщество в течение уже трех десятилетий постоянно снабжается ложными представлениями о масштабах будущих климатических изменений, что вызывает излишнее напряжение в обществе и обратную гипертрофированную реакцию. Но это не проблема неверного выбора сценария — настоящая проблема заключается в том, что *ни один* из предлагаемых десятков сценариев, по сути, не имеет никакого отношения к реальной эволюции мировой энергетики и эмиссии диоксида углерода. Поскольку реакция климатической системы зависит не только от объема выбросов, но и от их динамики, то задача корректного прогноза разви-

тия мировой энергетики приобретает вполне реальное практическое значение.

Авторами настоящей работы более 30 лет назад [2] был предложен метод генетического прогноза эволюции мировой энергетики, который оказался весьма надежным инструментом, позволяющим предвидеть генеральное развитие этой отрасли на много лет вперед. В его основу положен исторический экстраполяционный подход, широко распространенный в современных социологии и экономике в виде известной теории институциональных изменений [15], автор которой был удостоен Нобелевской премии по экономике в 1993 г. Основная идея этой теории заключается в том, что история развития сложных систем определяет их будущее поведение на много лет вперед. Последовательное применение генетического подхода (обнаружение и экстраполяция исторических тенденций в будущее) позволило сформулировать две фундаментальные тенденции, определяющие современные пути развития энергетики мира:

стабилизацию национального удельного энергопотребления на душу населения на уровне, зависящем главным образом от климатических и географических факторов [16] (как показывает рис. 2, этот процесс в большинстве развитых стран мира уже завершился);

неуклонное снижение в течение уже более 100 лет углеродной интенсивности K_C мировой энергетики (количества диоксида углерода, приходящегося на единицу потребления энергии) в результате изменений структуры топливно-энергетического баланса (рис. 3).

При реализации первой тенденции среднемировое удельное потребление энергии на душу населения должно составить 2.8–3.0 т у.т./(чел · год) (это немногим выше современного уровня), что при росте численности населения планеты к 2100 г. до примерно 10 млрд чел. [21] доведет ежегодное мировое потребление энергии до 28–30 млрд т у.т., а это лишь на 30–40% выше современного уровня. Таким образом, исторический подход ограничивает потребление энергии в текущем столетии именно этим сравнительно невысоким значением.

Между тем, авторы многих радикальных энергетических сценариев еще совсем недавно допускали рост энергопотребления до 60, 100 и даже 200 млрд т у.т./год (см., например, [4]), исходя из неверной гипотезы о том, что для достижения уровня жизни развитых стран необходим соответствующий им уровень потребления энергии. Эта идея жива до сих пор. При этом упускается из виду важное обстоятельство, что почти все высоко развитые страны расположены в средних и высоких широтах, требующих значительных (до 40% общей потребности) дополнительных расходов на отопление. Следует также учесть, что в системе

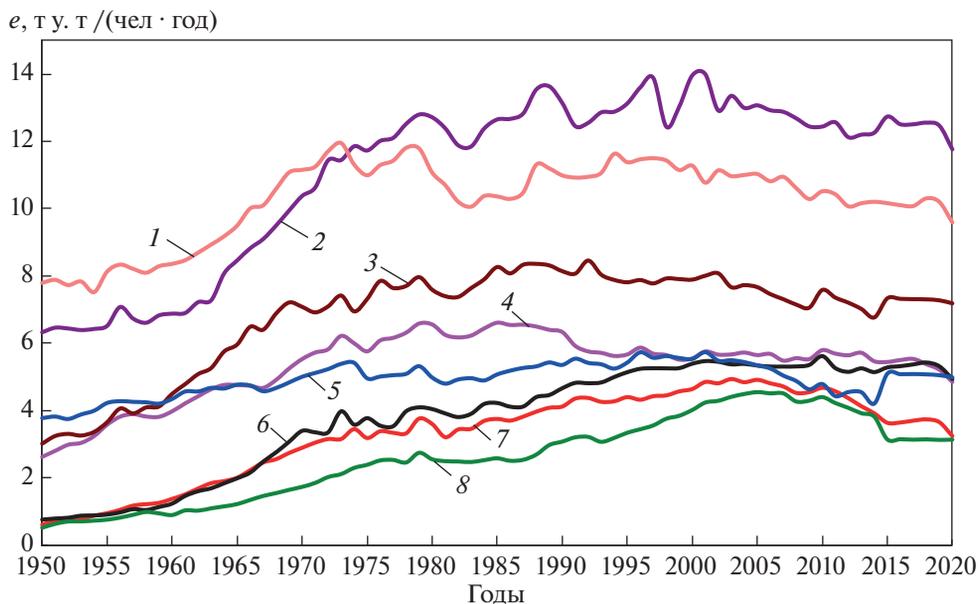


Рис. 2. Потребление энергии на душу населения e в развитых странах [17, 18].
1 – Канада; 2 – США; 3 – Швеция; 4 – Германия; 5 – Великобритания; 6 – Япония; 7 – Италия; 8 – Испания

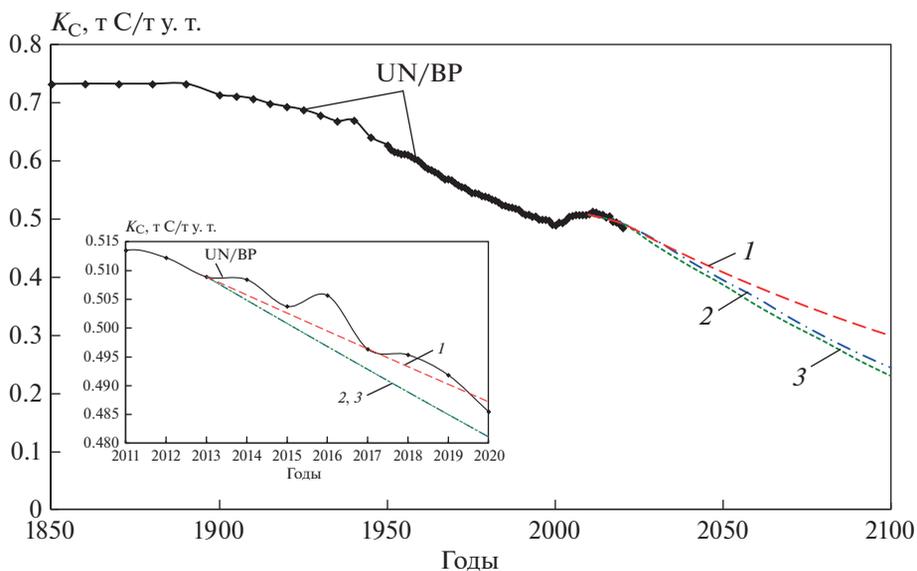


Рис. 3. Изменение углеродной интенсивности K_C мировой энергетики в 1850–2020 гг. (на врезке в 2011–2020 гг.): исторические данные UN/BP [17–19] и сценарии [20].
Сценарий: 1 – исторический; 2 – базовый; 3 – целевой

энергетика – климат при потеплении все больше проявляется обратная связь: чем выше температура, тем ниже потребность в энергии, что справедливо для всех стран, расположенных в тропической зоне [22]. Это относится, в первую очередь, к затратам энергии на отопление. Для такой страны, как Россия, это снижение уже составило около 10–15% показателей 30-летней давности, а к 2050 г. энергозатраты на отопление уменьшатся еще на 15–20% [23].

Сохранение второй тенденции означает снижение темпов роста антропогенного воздействия на климатическую систему. В частности, в ближайшие 10–15 лет можно ожидать достижения пика антропогенной эмиссии CO_2 (в пересчете на углерод) на уровне 10–11 Гт С/год, не слишком отличающемся от современного 9.5 Гт С/год (рис. 4). Неуклонное снижение углеродной интенсивности можно обосновать фундаментальным философским принципом

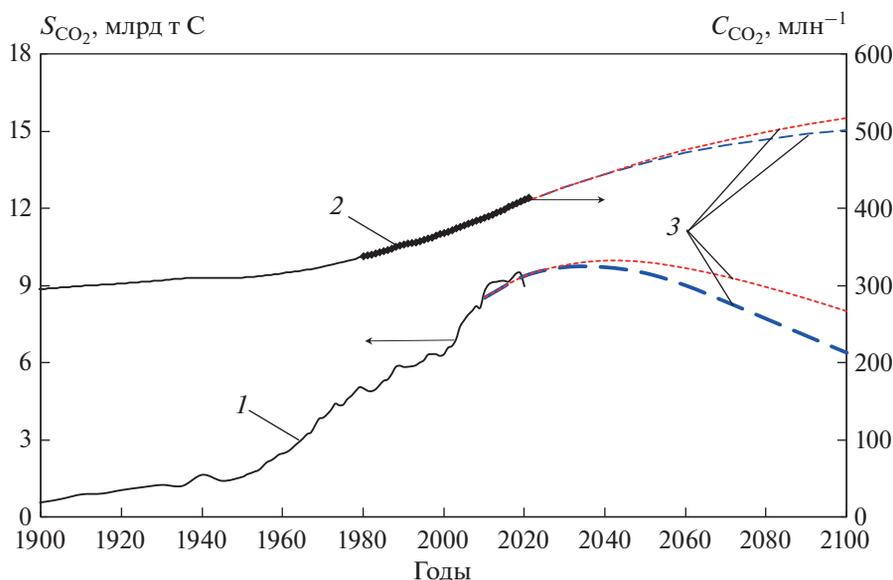


Рис. 4. Изменение мировой антропогенной эмиссии S_{CO_2} и концентрации диоксида углерода C_{CO_2} в атмосфере с 1900 до 2100 г.

1 — расчеты по данным ВР и UN [17, 18, 25]; 2 — данные измерений NOAA [26]; 3 — модельные оценки по сценариям [20]: историческому (пунктирные линии) и базовому (штриховые линии)

прогрессирующего упрощения, широко распространенным в природе и общественной жизни [24]. Применительно к энергетике этот принцип проявляется в постепенном переходе от более сложных, “законсервированных” в органическом топливе энергоносителей к более простым, естественным. Этому принципу полностью отвечает развитие мировой энергетики с начала индустриальной эпохи: от угля к нефти, затем к газу и, наконец, к нетрадиционным возобновляемым источникам энергии (НВИЭ) — солнечным, ветровым, биотическим и др. Глобальный энергопереход, ставший новой реальностью в последние 10 лет и сопровождающийся быстрым ростом потребления газа и еще более быстрым ростом потребления НВИЭ (со скоростью 12–15% в год), являет собой яркое свидетельство осуществления этого принципа.

Как было показано в [27], за последние 30 лет в мировом энергобалансе произошли принципиальные изменения, вследствие которых заметно снизилась скорость возрастания эмиссии CO_2 . К ним относятся:

повышение в энергобалансе доли газа, при сжигании которого образуется почти в 2 раза меньше диоксида углерода, чем при сжигании угля. Это обусловлено увеличением добычи газа не только из традиционных источников, но и из новых, нетрадиционных (сланцевый газ, угольный метан) (см. таблицу).

резкое усиление роли нетрадиционных возобновляемых источников энергии, прежде всего ветра, солнца и биомассы. На протяжении уже 30 лет

выработка энергии на НВИЭ растет со средней скоростью 12–15% в год, превзойдя в 2019 г. объем выработки на АЭС (см. таблицу).

В работе [4] для сравнения приведены генетический прогноз развития мировой энергетики, выполненный в 1990 г. [2], и данные по потреблению энергии за последние 30 лет [17, 18], а также прогнозы, составленные в 80-х годах прошлого века несколькими весьма авторитетными исследовательскими организациями. На протяжении всего этого периода отклонение фактических данных от расчетных составляло 3–4% и достигло максимума 6% в 2012 г. Генетический прогноз позволил совершенно верно предсказать резкое замедление ежегодных темпов роста энергопотребления на рубеже тысячелетий, которое в 1990–2020 гг. снизилось до 1.8% против 3.7% в 1950–1990 гг. Это обстоятельство стало полной неожиданностью для большинства аналитиков, в свое время ожидавших более чем двукратного увеличения потребления энергии в течение последней четверти века. В своих оценках они значительно завышают глобальную потребность в первичной энергии уже с начала 1990-х годов, и это расхождение продолжает нарастать со временем, достигая сейчас 40–50%. Более того, прогнозы 1980-х годов содержали целый ряд принципиальных ошибок, а именно:

1) предположение о том, что потребление в начале нефти, а затем газа пройдет свой пик еще на рубеже XX–XXI столетий ввиду скорого истощения их извлекаемых запасов. В действительности производство и потребление нефти и газа продол-

Структура потребления коммерческой энергии* в мире, %

Вид источника энергии	Исторические данные [17, 18]			Прогноз [20]	
	1980 г.	2000 г.	2019 г.	2050 г.	2100 г.
Нефть	40.4	35.5	29.8	28	7
Уголь	29.5	24.7	27.0	9	14
Природный газ	19.9	26.1	27.3	32	15
Ядерная энергетика	3.4	6.4	4.5	5	5
Гидроэнергетика	6.5	6.7	7.0	8	8
НВИЭ	0.2	0.5	4.5	18	52

* Коммерческая (торгуемая) энергия – энергия, приобретаемая за деньги. Сюда не входят такие виды энергоресурсов, как дрова и прочее топливо, заготавливаемые самим населением, мускульная сила скота и людей и т.д.

жают расти и максимум добычи нефти будет достигнут не ранее середины, а газа – лишь во второй половине текущего столетия. Даже в конце XXI в. потребление газа, в основном за счет введения в эксплуатацию обширных нетрадиционных запасов (сланцевого, угольного метана, газа плотных формаций), будет всё еще на уровне нынешнего [28];

2) предполагалось, что АЭС значительно потеснят другие источники энергии, а их доля в общем энергопотреблении в первой четверти XXI в. превысит 15–20%. В действительности атомная энергетика переживает затяжной кризис, особенно усилившийся после аварии на станции Fukushima в марте 2011 г. Среднегодовой рост выработки АЭС в последние 25 лет составил ничтожные 0.7%, что существенно меньше, чем для любого другого вида энергии, а их доля в мировом энергопотреблении за те же 25 лет упала с 5.6 до 4.2%, и нет никаких шансов, что она может значительно вырасти в ближайшие 30–40 лет. На это вполне определенно указывает недавняя ежегодная публикация Международного агентства по атомной энергии, в которой, как всегда, представлены два сценария будущего – высокий и низкий [29]. Учитывая, что за всю 40-летнюю историю создания подобных прогнозов не было ни одного случая осуществления высокого сценария, правильнее опереться на данные низкого варианта, согласно которому выработка электроэнергии на АЭС к 2050 г. должна составить немногим более 3.1 трлн кВт · ч, что практически в точности соответствует современному уровню. Это означает, что доля АЭС в общем энергопотреблении продолжит падать и не превысит тех же 4% к середине столетия;

3) роль НВИЭ в обозримом будущем представлялась весьма незначительной. На самом деле НВИЭ, без сомнения, являются самым динамичным видом мировой энергетики, демонстрирующим в течение последних 25 лет поразительные темпы роста в 12–15% в год. В 2020 г. электростанции на основе НВИЭ впервые произвели бо-

лее 3 трлн кВт · ч в год, а за год до этого превосходили атомную энергетику по объему производства электроэнергии. В рамках исторического подхода возобновляемые источники энергии (включая гидроэнергетику) займут ведущее место в мировом энергобалансе уже через 20–30 лет [20].

Таким образом, реальная энергетическая картина мира в начале XXI в. сильно отличается от ее изображения в недавних сценариях, которые были рассчитаны, по крайней мере, на три четверти столетия. Разумеется, что основанные на них представления о динамике эмиссии CO₂ и его концентрации в атмосфере также были весьма далеки от реальности. Напротив, генетический прогноз позволил с высокой степенью точности предсказать реальную эволюцию эмиссии и концентрации углекислого газа в последнюю четверть столетия (см. рис. 4). Именно концентрация CO₂ является важнейшим параметром, который непосредственно используется в расчетах температуры воздуха во всех климатических моделях, и поэтому точность ее определения можно считать решающей для подобных расчетов. Рисунок 4 показывает, что генетический прогноз без коррекции позволил предсказать концентрацию CO₂ в последние 30 лет с беспрецедентно высокой точностью – ошибка составила менее 1%, что эквивалентно погрешности вычисления среднеглобальной температуры в пределах 0.02–0.04°C при чувствительности климатической системы 1.5–3.0°C к удвоению концентрации CO₂.

Поскольку генетический прогноз обнаруживает удивительную устойчивость на 30-летнем интервале и не требует частой корректировки со временем, можно предположить, что он будет демонстрировать сходные показатели, по крайней мере, в течение нескольких следующих десятилетий. В этой связи интересно взглянуть на результаты этого прогноза до конца текущего столетия (см. рис. 4). Авторы настоящей статьи полагают, что рост эмиссии углерода, несмотря на все усилия мирового сообщества по ее ограничению, за-

вершится лишь в следующем десятилетии на уровне 10–11 млрд т С/год, после чего начнется ее медленное снижение. Однако и в конце столетия уровень эмиссии будет не ниже 6 млрд т С/год в результате сжигания значительных количеств угля и нетрадиционного газа. Для достижения нулевых нетто-выбросов эта остаточная эмиссия должна быть нейтрализована депонированием углерода в геологических формациях и живой биоте путем ведения интенсивного лесного хозяйства — в недавней работе авторов [30] было показано, что возможности биосферы в этом смысле весьма ограничены и, более того, они будут угасать со временем. Поэтому достижение целей климатически нейтральной экономики, т.е. с нулевыми нетто-выбросами, провозглашенное лидерами всех развитых и многих развивающихся стран мира, видится нереальным ни к 2050 г., ни даже в более отдаленной перспективе исходя из богатого исторического опыта эволюции энергетики и первого десятилетия реализации Парижского соглашения [20].

С позиций климатологии важнейшим фактором является кумулятивный выброс диоксида углерода, поскольку именно он определяет концентрацию CO_2 в атмосфере и радиационный форсинг (вклад в изменение теплового баланса атмосферы) этого парникового газа. Предсказанный авторами [2] уровень кумулятивной эмиссии за последние 30 лет (1990–2019 г.) 228 Гт С практически не отличается от реального (227 Гт С), рассчитанного по данным [17, 18]. Таким образом, можно надеяться, что ошибка в вычислениях выбросов углерода в атмосферу до конца текущего столетия будет находиться в пределах 5–7%. Для сравнения следует отметить, что диапазон кумулятивной эмиссии углекислого газа по сценариям группы SRES [13] к 2100 г. составляет более 50% медианного значения.

По представлениям авторов скорость роста концентрации диоксида углерода будет уменьшаться с современного значения 0.6% в год [26] до 0.3% в середине столетия и 0.1% в его конце (см. рис. 4). Концентрация достигнет максимального значения немногим более 500 млн^{-1} в первой половине XXII в., после чего начнется ее медленное снижение, вызванное поглощением избыточного углерода атмосферой океаном и наземной биотой, а также развитием технологий захоронения углерода.

Таким образом, генетический прогноз дает результаты, которые лежат *существенно ниже наименее агрессивных* сценариев антропогенного воздействия (B1 из семейства сценариев SRES [13] и RCP 4.5 из недавнего семейства сценариев [14]). Осуществление наиболее агрессивных сценариев, таких как A1FI, A1B [13] или RCP 8.5, RCP 6.0 [14], согласно историческому подходу выглядит невероятным, а тревога по поводу наступления

соответствующих последствий совершенно необоснованной. Тем не менее, приближение концентрации CO_2 к 500 млн^{-1} не оставляет надежды на возможность удержания повышения среднеглобальной температуры не только в пределах 1.5, но и 2°C еще до конца нынешнего столетия.

Одна из возможностей предотвращения нежелательного потепления при продолжении использования органического топлива заключается в широкой реализации технологий захоронения углерода. Однако стоимость захоронения в настоящее время настолько высока, что препятствует широкомасштабному применению этой технологии — достаточно сказать, что сейчас в мире лишь восемь стран эксплуатируют 26 коммерческих установок общей мощностью 11 млн т углерода в год, что составляет всего 0.08% ежегодной эмиссии (с учетом всех парниковых газов). В то же время считается, что для реального сдерживания дальнейшего глобального потепления необходимо предотвращать поступление в атмосферу от 1.2 до 4.0 млрд т углерода ежегодно, т.е. на два-три порядка больше. Современная динамика распространения технологий захоронения также не внушает особого оптимизма, поскольку общая мощность работающих, строящихся и планируемых установок за последние 10 лет не только не возросла, но даже уменьшилась на 20% [31].

СНИЖЕНИЕ АНТРОПОГЕННЫХ ВЫБРОСОВ ОКСИДОВ СЕРЫ

Помимо диоксида углерода, энергетика является основным источником еще одного климатически значимого компонента атмосферы — оксидов серы SO_x . Как известно [1], эти оксиды, вступая в реакцию с атмосферной влагой, образуют тропосферный сульфатный аэрозоль, эффективно препятствующий поступлению солнечной радиации и оказывающий таким образом заметное охлаждающее влияние на климат Земли. Вклад этого аэрозоля в радиационный баланс атмосферы Земли весьма велик и оценивается в настоящее время примерно в 25–30% суммарного антропогенного парникового эффекта. Таким образом, важность корректных оценок поступления серы в атмосферу не подлежит сомнению. Между тем фундамент многих прогнозов, выполненных всего 25–30 лет назад, оказался весьма ненадежным, и предсказанная в них картина резко разошлась с действительной динамикой выбросов. Так, наиболее ранняя работа [32], авторы которой опирались на явно завышенные с нынешней точки зрения оценки будущего потребления угля и нефти (8.5–11.0 млрд т у.т. в 2000 г. и 11–15 млрд т у.т. в 2030 г.) и недооценивали будущие темпы внедрения природоохранных технологий в энергетике, даже в наиболее “экологическом” сценарии предсказывала рост выбросов оксидов серы в первой

трети XXI столетия до 230 млн т/год (в пересчете на SO_2) и их незначительное снижение только к 2050 г. (рис. 5).

Теми же самыми недостатками, очевидно, обладал и сценарий Межправительственной группы экспертов по изменениям климата IS92a [12], долго применявшийся в климатических исследованиях в качестве базового и предусматривавший введение контроля над выбросами вредных веществ на международном уровне и их снижение в развивающихся странах лишь к середине XXI в. Уже сейчас совершенно ясно, что, несмотря на качественно верные предположения, лежащие в его основе, этот сценарий предсказал сильно завышенные значения эмиссии: так, для 2020 г. он давал значение 228 млн т SO_2 , что в 2 раза с лишним выше реально достигнутых значений (рис. 6). Такая серьезная ошибка на дистанции прогноза всего 28 лет не оставляет никаких надежд на возможность его использования на более отдаленную перспективу. Более того, в этом же сценарии предполагался неуклонный рост мировых выбросов SO_x вплоть до 2050 г., когда они должны были превысить объем 300 млн т $\text{SO}_2/\text{год}$, что опять же в 2 раза с лишним превышает современное значение. И надо же такому случиться, что именно этот сценарий до определенного времени широко использовался для расчетов возможных изменений природной среды и климата. Даже основной сценарий (reference case B) весьма компетентной организации – Всемирного энергетического совета (WEC) [39] – не предполагал до 2020 г. снижения выбросов оксидов серы (см. рис. 6).

Во второй серии сценариев МГЭИК [13], подготовленной в 2000 г., значения глобальной эмиссии в период до 2100 г., соответствующие оценкам настоящей работы, относятся к группе сценариев A1T, предполагающих широкое внедрение природоохранных технологий при достаточно высоком уровне энергопотребления. По иронии судьбы, именно эти сценарии **почти никогда** не используются для оценок теплового радиационного баланса Земли. Единственным исключением из работ этого периода является обзор WEC 1998 г. [40], в котором все сценарии развития энергетики, кроме одного, предполагают существенное снижение эмиссии оксидов серы к 2020 г. (до 40% уровня 1990 г.) и еще большее (до 60%) – к 2050 г.

В действительности, несмотря на полуторакратное увеличение потребления серосодержащего топлива (угля и нефти) в последние 25 лет [17, 18], эмиссия оксидов серы в это время постепенно снижалась (см. рис. 5, 6), что полностью соответствует выводам ранней работы авторов [33], в основе которой лежит исторический подход. Более того, авторы полагают, что пока слабая тенденция к снижению серных выбросов, обна-

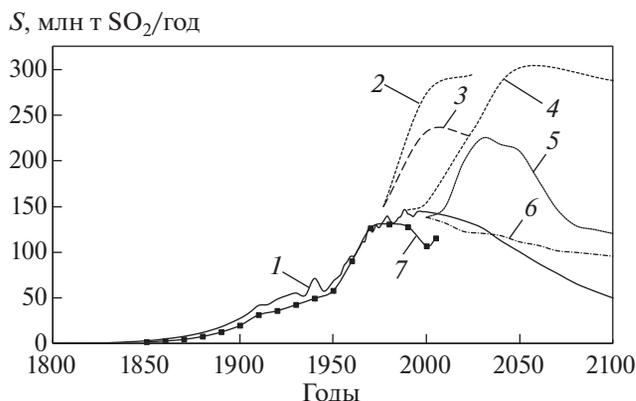


Рис. 5. Мировая антропогенная эмиссия диоксида серы S в 1800–2100 гг. 1 – оценка и прогноз МЭИ [33]; сценарии: 2 – высокий, 3 – низкий Мёллера [27]; 4 – IS92a МГЭИК [12]; 5 – A2 (5), 6 – B2 МГЭИК [13]; 7 – исторические данные [34]

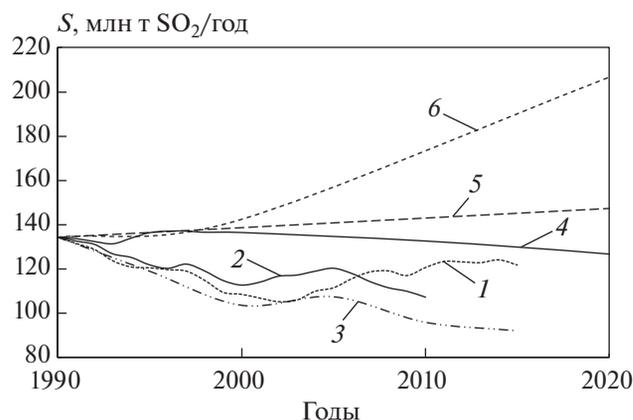


Рис. 6. Мировая антропогенная эмиссия оксидов серы S в 1990–2020 гг. Оценки фактических выбросов: 1 – EDGAR [35]; 2 – AEROCOM [36, 37]; 3 – ECLIPSE [38]; 4 – прогноз МЭИ [33]; 5 – базовый сценарий WEC [39]; 6 – сценарий IS92a МГЭИК [12] (все данные линейно сведены к единому значению в 1990 г.)

ружившаяся в последние два десятилетия, уже в скором времени получит дальнейшее развитие, поскольку теперь уже все регионы планеты осуществляют планомерное снижение ежегодных выбросов SO_x [35–37]. Особая роль здесь принадлежит Китаю, еще недавно ответственному почти за 30% глобальной эмиссии SO_x , которому после 2006 г. удалось добиться ее заметного снижения на фоне резко растущего энергопотребления. Дело в том, что завершившийся 13-й (2016–2020 гг.) и особенно текущий 14-й (2021–2025 гг.) пятилетний планы экономического развития Китая ставят дальнейшую борьбу с выбросами оксидов серы в число главных приоритетов национальной экологической политики.

Таким образом, современный этап развития мировой цивилизации характеризуется постепенным переносом основной экологической нагрузки с промышленно развитых на развивающиеся страны. Без активного внедрения природоохранных технологий в странах третьего мира сокращение выбросов серы (как, впрочем, и других вредных веществ и парниковых газов) в глобальном масштабе невозможно. Однако нет решительно никаких оснований предполагать, что эмиссия серы в ближайшие десятилетия может значительно вырасти – так, как это до сих пор предполагалось, в частности, в некоторых сценариях МГЭИК [13], которые до недавнего времени широко использовались в качестве научного базиса для построения прогнозов будущих изменений климата.

ПРИРОДНЫЕ КЛИМАТИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ И ЕСТЕСТВЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ КЛИМАТА

Развитие глобального потепления на протяжении последних 120 лет не без оснований связывают с антропогенным фактором. Производственная деятельность человека, прежде всего традиционная энергетика, базирующаяся на сжигании органических ископаемых топлив, приводит к накоплению многоатомных газов в атмосфере (диоксида углерода CO_2 , метана, оксидов серы SO_x и др.), которые модифицируют баланс между падающим от Солнца излучением и излучением, отраженным от поверхности Земли, в сторону более высокой температуры атмосферы. Такая упрощенная схема, особо любимая падкими до сенсаций журналистами, имеет право на существование, поскольку самый мощный природный фактор влияния на климатическую систему – Солнце – характеризуется гораздо большими временами воздействия. В самом деле, оказывающие наиболее существенное влияние орбитальные циклы Миланковича, определяющие наступление ледниковых и сменяющих их теплых эпох, имеют периоды в десятки и сотни тысяч лет.

Упрощенная схема антропогенного воздействия на климат не в состоянии объяснить немонотонный характер роста среднелобальной температуры (см. рис. 1), особенно с учетом того, что увеличение концентрации CO_2 отличается постоянством (см. рис. 2). Это означает, что помимо концентрации CO_2 и других парниковых газов (метана, закиси азота, озона и др.) существует еще ряд факторов, которые могут ограничивать тенденцию роста температуры и даже на определенных отрезках времени обращать ее вспять. Недавняя такая аномалия, получившая в научной литературе название Малого перерыва (в отличие от Большого перерыва в 1930–1950 гг.), наблюдалась в начале нашего века, когда средняя температура за 2006–2010 гг. оказалась меньше, чем за предыдущую

пятилетку 2001–2005 гг. Средняя по планете температура в период с 1998 по 2013 г. почти вообще прекратила рост, а в Южном полушарии наблюдалось даже уменьшение средней температуры. И это при том, что в течение этих же 15 лет концентрация диоксида углерода в атмосфере исправно росла, увеличившись с 366 до 395 млн⁻¹.

Причиной отмеченного непостоянства роста средней температуры являются природные факторы. Сравнительно недавно появилась возможность проанализировать достаточно продолжительные временные ряды средних глобальной и полушарных температур воздуха за период 1850–2020 гг. [1, 7]. В целях проведения настоящего исследования из этих рядов предварительно был удален долгопериодный антропогенный тренд, вызванный накоплением парниковых газов и аэрозолей в атмосфере, рассчитанный на комбинированной (сочетающей энергобалансовый и статистический блоки) модели климата МЭИ [41, 42]. На рис. 7 представлены результаты исследования этих рядов методом максимальной энтропии. Как видно, в этих рядах имеются весьма устойчивые 70- и 20-летние циклы. Наблюдаются также менее значимые 9- и 6-летние циклы. Похожие результаты были получены и ранее [11].

Данные непрерывного вейвлет-анализа рядов глобальной и полушарных температур (рис. 8) также показывают наличие весьма устойчивых примерно 70- и 20-летних циклов за все время инструментальных наблюдений с середины XIX в. Менее значимый 9-летний цикл наблюдался в большей части (1870–1900 и 1940–2000 гг.), а 6-летний – в значительной части общего периода наблюдений.

Наиболее длительный 70-летний цикл, по-видимому, обусловлен квазипериодическими изменениями атмосферной и океанической циркуляции, известными как Североатлантическое колебание (NAO) и Атлантическая мультидекадная осцилляция (AMO). Оба эти явления тесно связаны одно с другим и, более того, представляют собой две стороны одной медали – внутренней неустойчивости глобальной климатической системы [43–45]. На протяжении цикла заметно меняется интенсивность перемещения теплых субтропических вод на север, что сказывается на климате полушария и мира в целом. Ряды индексов AMO/NAO (аномалии температуры поверхности океана и давления над ним) содержат примерно 60–70-летнюю циклическую компоненту [43, 46, 47] и обнаруживают сильную положительную корреляцию с рядами температуры Северного полушария [45, 48].

Периоды с положительными индексами AMO/NAO характеризуются более интенсивным западным переносом воздушных масс и заметным потеплением большей части нетропической

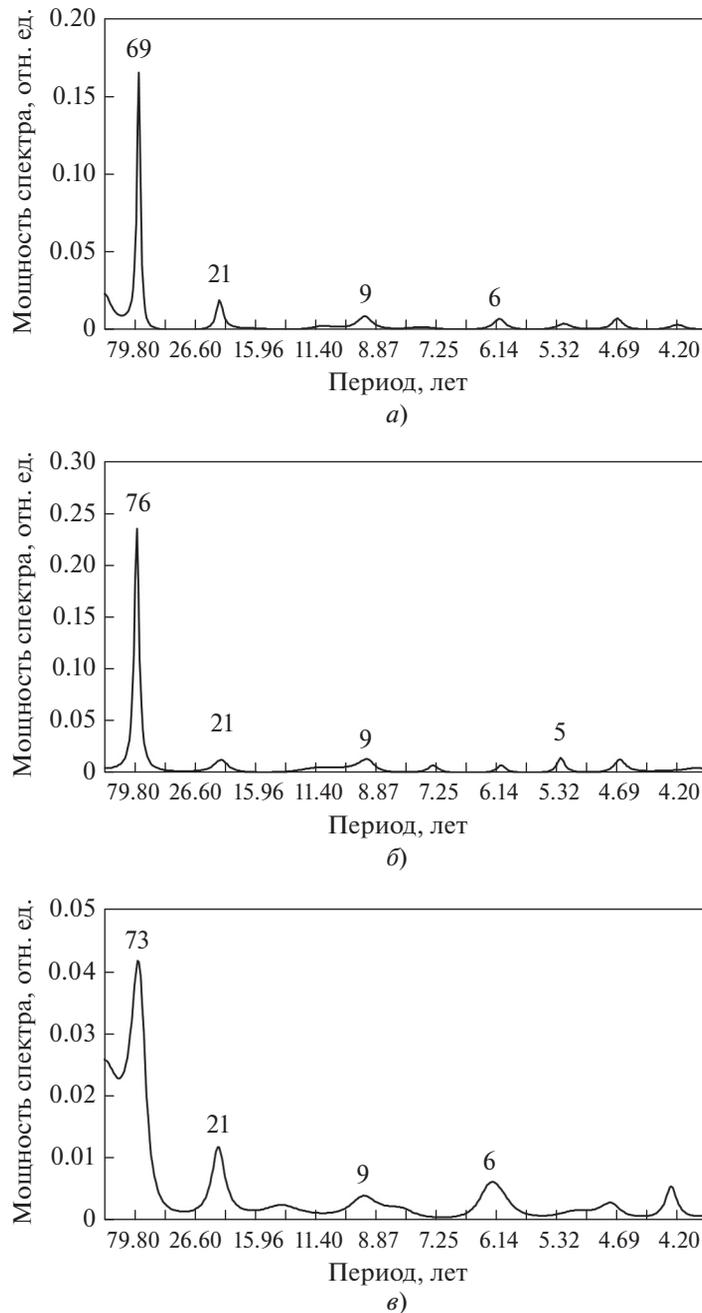


Рис. 7. Оценка спектра мощности остаточных рядов температуры воздуха методом максимальной энтропии: глобальной (а); Северного полушария (б); Южного полушария (в). Размерность метода выбрана равной $1/3$ продолжительности ряда с 1850 по 2020 г.

зоны Северного полушария, особенно выраженным в зимне-весенний период. Кстати, именно такой сезонной асимметрией отличалась самая быстрая фаза современного потепления (1975–2005 гг.), что также свидетельствует в пользу связи полушарных и глобальных температур с событиями в Северной Атлантике.

Двадцатилетний цикл определяется так называемым Южным колебанием (SO) и поэтому наи-

более выражен в Южном полушарии (см. рис. 7, 8). В свою очередь Южное колебание представляет собой составную часть более масштабного явления – Тихоокеанской декадной осцилляции (PDO), имеющей в своем спектре вполне определенный бидекадный цикл. В последние годы появились явные свидетельства того, что PDO является важным фактором глобального климата, оказывающим влияние далеко за пределами Тихого океана

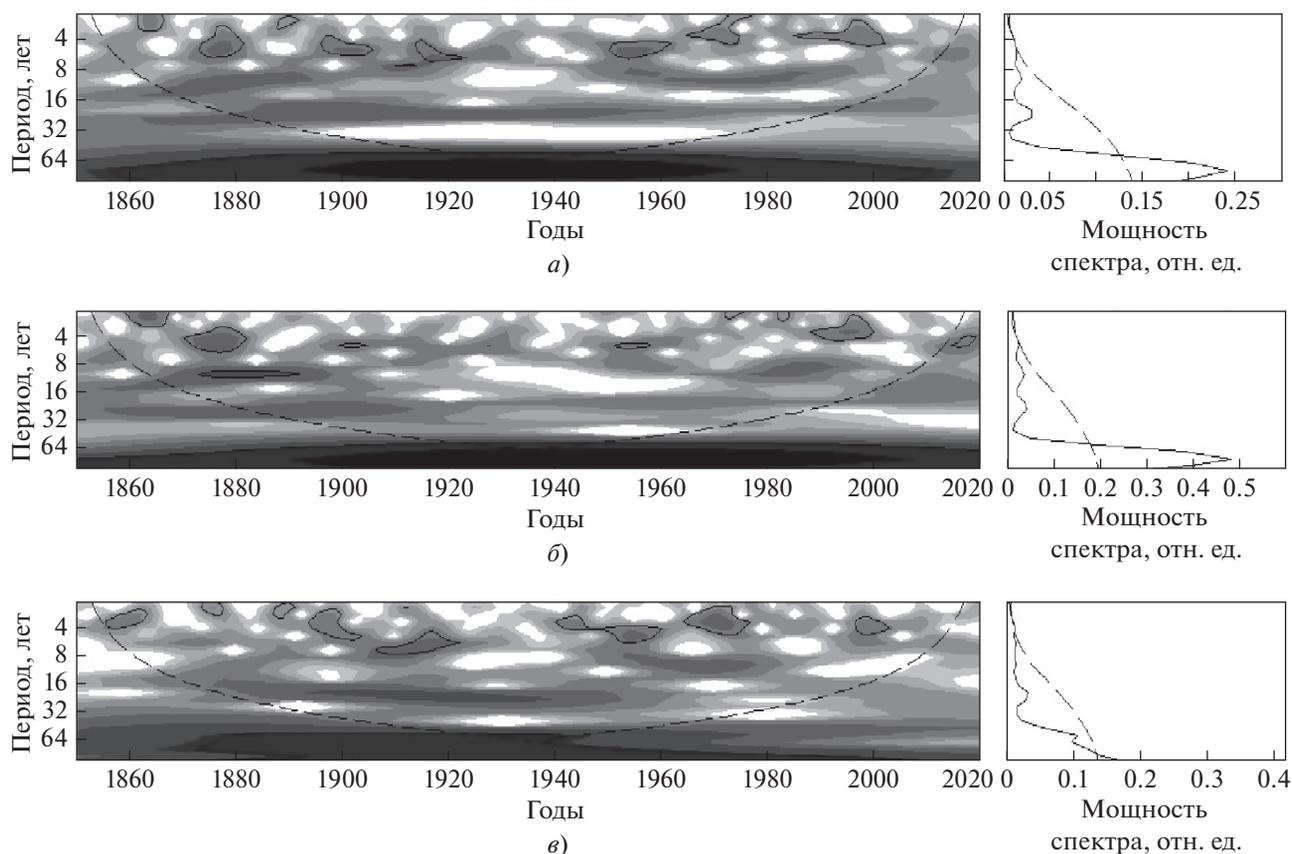


Рис. 8. Нормализованные вейвлет-спектры мощности (слева) и глобальные вейвлет-спектры (справа) остаточных рядов температуры воздуха: глобальной (а); Северного полушария (б); Южного полушария (в). Темные области соответствуют большим значениям мощности спектра. На вейвлет-спектре сплошными линиями отмечены границы 90%-ной области достоверности относительно красного шума; штриховой линией показан конус влияния конечных эффектов. На глобальном спектре уровень 90%-ной значимости показан штриховой линией, сплошной – мощность этого глобального вейвлет-спектра

и имеющим прямое отношение к возникновению пауз в глобальном потеплении как в XX, так и в XXI в. [49]. Здесь следует подчеркнуть, что открытие и описание долгопериодных природных ритмов в температуре вод Атлантического и Тихого океанов состоялось лишь в последние два десятилетия и, таким образом, ранее не могло учитываться в климатических прогнозах на дальнюю перспективу.

Анализ динамики индексов АМО/NAO и PDO/SO дает основания полагать, что в обозримом будущем эти природные явления будут замедлять развитие глобального потепления и его темпы окажутся меньше, чем максимальные 0.2°C за декаду, наблюдавшиеся в 1975–2005 гг. Индекс АМО, достигший локального максимума между 2005–2010 гг., начал снижение и скоро должен войти в отрицательную зону. Тихоокеанский индекс PDO также миновал очередной максимум в 2017 г., и, таким образом, сейчас впервые за последние 60 лет происходит одновременное снижение интенсивности обоих главных циркуляционных индексов.

Аналогичная ситуация в последний раз возникла после 1960 г., что вызвало тенденцию к глобальному похолоданию, наиболее ярко проявившуюся в Северном полушарии. Помимо уменьшения индексов АМО и PDO свою лепту в сдерживание глобального потепления вносит Солнце – солнечная постоянная к настоящему моменту опустилась до минимальных значений за всю почти 50-летнюю историю спутниковых наблюдений. Более того, по нашим оценкам [50], снижение солнечной постоянной продлится еще на протяжении двух солнечных циклов, т.е. до 2044 г.

ВЫВОДЫ

1. Построение прогнозов развития энергетики и изменения климата относится к числу весьма трудоемких и неблагодарных занятий. Задачу дополнительно осложняет то обстоятельство, что возникающие новые тенденции в энергетике, а также ранее не известные природные факторы приводят к существенным ошибкам в прогнозах.

2. Комбинированное использование историко-экстраполяционного подхода к прогнозированию развития мировой энергетики и других источников антропогенного воздействия на атмосферу и климат планеты, а также всесторонний учет природных климатических факторов и особенностей естественной изменчивости глобального климата позволяют провести адекватные оценки динамики мировой климатической системы. Эти оценки могут быть использованы для обоснования путей развития мировой энергетики в целях предотвращения катастрофических климатических изменений.

3. Рассмотренные в статье факторы антропогенного и природного характера сегодня оказывают сдерживающее влияние на потепление климата. Этот эффект окажется долговременным и сменяющейся интенсивностью распространится вплоть до конца текущего столетия. Однако без применения масштабных дополнительных мер по поглощению углекислого газа не удастся предотвратить дальнейший рост температуры и выполнить установленное Парижским соглашением ограничение потепления в 2°C к 2100 г. по сравнению с доиндустриальной эпохой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Climate** Change 2013. V. 1: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / ed. by T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Vex, P.M. Midgley. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
2. **Энергия** и климат: что же в самом деле известно науке? / В.В. Клименко, А.В. Клименко, С.Ю. Снытин, М.В. Федоров // Теплоэнергетика. 1994. № 1. С. 5–11.
3. **Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г.** Энергетика и климат на рубеже веков: прогнозы и реальность // Теплоэнергетика. 2001. № 10. С. 61–66.
4. **Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г.** Опыт построения дальних прогнозов воздействия мировой энергетики на атмосферу Земли // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2015. Т. 51. № 2. С. 158–168. <https://doi.org/10.7868/S0002351515020078>
5. **Solar forcing for CMIP 6 (v 3.2)** / K. Mattes, B. Funke, M.E. Andersson, L. Barnard, J. Beer, P. Charbonneau, M.A. Clilverd, T.D. de Wit, M. Haberreiter, A. Hendry, C.H. Jackman, M. Kretzschmar, T. Kruschke, M. Kunze, U. Langematz et al. // *Geosci. Model Dev.* 2017. V. 10. № 6. P. 2247–2302. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-2247-2017>
6. **The PMIP 4 contribution to CMIP 6. Part 3: The last millennium, scientific objective, and experimental design for the PMIP 4 past 1000 simulations** / J.H. Jungclaus, E. Bard, M. Baroni, P. Braconnot, J. Cao, L.P. Chini, T. Egorova, M.A. Clilverd, T.D. de Wit, M. Haberreiter, A. Hendry, C.H. Jackman, M. Kretzschmar, T. Kruschke, M. Kunze et al. // *Geosci. Model Dev.* 2017. V. 10. № 11. P. 4005–4033. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4005-2017>
7. **Uncertainty** estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850 / P. Brohan, J.J. Kennedy, I. Harris, S.F.B. Tett, P.D. Jones // *J. Geophys. Res.* 2006. V. 111. № D12106. <https://doi.org/10.1029/2005JD006548>
8. **Climate** Change. The IPCC Scientific Assessment / ed. by J.T. Houghton, G.J. Jenkins and J.J. Ephraums. Cambridge: Cambridge University Press, 1990.
9. **Антропогенные** изменения климата / под ред. М.И. Будыко, Ю.А. Израэля. Л.: Гидрометеоздат, 1987.
10. **Клименко В.В., Снытин С.Ю., Федоров М.В.** Энергетика и предстоящее изменение климата в 1990–2020 гг. // Теплоэнергетика. 1990. № 6. С. 14–20.
11. **Клименко В.В.** Почему замедляется глобальное потепление? // Докл. РАН. 2011. Т. 440. № 4. С. 536–539.
12. **Climate** change 1992: The supplementary report to the IPCC scientific assessment / ed. by J.T. Houghton, B.A. Callander, S.C. Verney. Cambridge: Cambridge University Press, 1992.
13. **Special** report on emission scenarios / Ed. by N. Nakicenović, R. Swart. IPCC. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
14. **The next** generation of scenarios for climate change research and assessment / R.H. Moss, J.A. Edmonds, K.A. Hibbard, M.R. Manning, S.K. Rose, D.P. van Vuuren, T.R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G.A. Meehl, J.F.B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S.J. Smith et al. // *Nature.* 2010. V. 463. № 7282. P. 747–756. <https://doi.org/10.1038/nature08823>
15. **North D.C.** Institutions, institutional change and economic performance. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511808678>
16. **Клименко В.В.** Влияние климатических и географических условий на уровень потребления энергии // Докл. РАН. 1994. Т. 339. № 3. С. 319–332.
17. **Energy** Statistics Yearbook 2018. N.Y.: United Nations (UN), 2021.
18. **BP** Statistical Review of World Energy 2021. L.: British Petroleum p. 1. с, 2021. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>
19. **Global** Energy Review 2021. Assessing the effects of economic recoveries on global energy demand and CO₂ emissions in 2021. Paris: International Energy Agency, 2021.
20. **Избежать** потепления на 2°C – миссия невыполнима / В.В. Клименко, А.В. Клименко, О.В. Микушина, А.Г. Терешин // Теплоэнергетика. 2016. № 9. С. 3–8. <https://doi.org/10.1134/S0040363616090022>
21. **World** Population Prospects: The 2019 Revision. N.Y.: UN, 2019.
22. **Roshan G., Arab M., Klimenko V.** Modeling the impact of climate change on energy consumption and carbon

- dioxide emissions of buildings in Iran // *J. Environ. Health Sci. Eng.* 2019. V. 17. № 2. P. 889–906. <https://doi.org/10.1007/s40201-019-00406-6>
23. **Влияние** изменений климата на производство, распределение и потребление энергии в России / А.В. Клименко, В.В. Клименко, А.Г. Терешин, Е.В. Федотова // *Теплоэнергетика*. 2018. № 5. С. 5–16. <https://doi.org/10.1134/S0040363618050053>
 24. **Тойнби А.Дж.** Постигание истории. М.: Прогресс, 1991.
 25. **Boden T.A., Andres R.J., Marland G.** Global regional, and national fossil-fuel CO₂ emissions. USA Carbon Dioxide Information Analysis Center; Oak Ridge National Laboratory; US Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee, 2017. https://doi.org/10.3334/CDIAC/00001_V2017
 26. **Tans P., Keeling R.** Global greenhouse gas reference network. Trends in atmospheric carbon dioxide. NOAA/ESRL, 2014. <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>
 27. **Клименко В.В., Клименко А.В., Терешин А.Г.** От Рио до Парижа через Киото: как усилия по охране глобального климата влияют на развитие мировой энергетики // *Теплоэнергетика*. 2019. № 11. С. 5–15. <https://doi.org/10.1134/S004036361911002X>
 28. **Клименко В.В., Терешин А.Г.** Нетрадиционный газ и трансформация глобального углеродного баланса // *Докл. РАН*. 2013. Т. 453. № 1. С. 95–98. <https://doi.org/10.7868/S0869565213230199>
 29. **Energy**, Electricity and nuclear power estimates for the period up to 2050. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2021.
 30. **Клименко В.В., Микушина О.В., Терешин А.Г.** Динамика биотических потоков углерода при различных сценариях изменения площади лесов // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2020. Т. 56. № 4. С. 462–472. <https://doi.org/10.31857/S0002351520040033>
 31. **Global Status of Carbon Capture and Storage 2020**. Global CCS Institute, 2020.
 32. **Möller D.** Estimation of the global man-made sulphur emissions // *Atmospheric Environment*. 1984. V. 18. № 1. P. 19–27. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(84\)90225-7](https://doi.org/10.1016/0004-6981(84)90225-7)
 33. **Перспективы** снижения выбросов оксидов серы в атмосферу при сжигании органических топлив / Н.Ю. Кудрявцев, В.В. Клименко, В.Б. Прохоров, С.Ю. Снытин // *Теплоэнергетика*. 1995. № 2. С. 6–11.
 34. **Historical** (1850–2000) gridded anthropogenic and biomass burning emissions of reactive gases and aerosols: methodology and application / J.-F. Lamarque, T.C. Bond, V. Eyring, C. Granier, A. Heil, Z. Klimont, D. Lee, C. Liousse, A. Mieville, B. Owen, M.G. Schultz, D. Shindell, S.J. Smith, E. Stehfest, J. van Aardenne et al. // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V. 10. № 15. P. 7017–7039. <https://doi.org/10.5194/acp-10-7017-2010>
 35. **Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR)**. Release version 4.2. 2010. European Commission, Joint Research Centre (JRC)/PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2010. <http://edgar.jrc.ec.europa.eu>
 36. **Inverted** and documented aerosol emissions for the period 2001 to 2010 / N. Huneus, O. Boucher, F. Chevallier, H. Denier van der Gon, C. Granier. AER D66.4. Paris, France: Laboratoire de Météorologie Dynamique, 2013.
 37. **Anthropogenic**, biomass burning, and volcanic emissions of black carbon, organic carbon, and SO₂ from 1980 to 2010 for hindcast model experiments / T. Diehl, A. Heil, M. Chin, X. Pan, D. Streets, M. Schultz, S. Kinne // *Atmos. Chem. Phys. Discuss.* 2012. V. 12. № 9. P. 24895–24954. <https://doi.org/10.5194/acpd-12-24895-2012>
 38. **Global** and regional trends of atmospheric sulfur / W. Aas, A. Mortier, V. Bowersox, R. Cherian, G. Faluvegi, H. Fagerli, J. Hand, Z. Klimont, C. Galy-Lacaux, C.M.B. Lehmann, C.L. Myhre, G. Myhre, D. Olivie, K. Sato, J. Quaas et al. // *Sci. Reports*. 2019. V. 9. № 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37304-0>
 39. **Energy** for Tomorrow's World: WEC Commission global report. L.: Kogan Page, 1993.
 40. **Nakicenovic N., Grubler A., McDonald A.** Global energy perspectives. IASA/WEC. Cambridge: Cambridge University Press, 1998. <https://doi.org/10.1002/ep.670180305>
 41. **Энергия**, природа и климат / В.В. Клименко, А.В. Клименко, Т.Н. Андрейченко, В.В. Довгало, О.В. Микушина, А.Г. Терешин, М.В. Федоров. М.: МЭИ, 1997.
 42. **Klimenko V.V., Mikushina O.V., Tereshin A.G.** A combined model for analysis and projection of the regional air temperature dynamics // *Proc. SPIE, 23rd Intern. Symp. on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. Irkutsk, Russian Federation, 3–7 July 2017. id. 10466 <https://doi.org/10.1117/12.2287753>
 43. **Olsen J., Anderson N.J., Knudsen M.F.** Variability of the North Atlantic Oscillation over the past 5.200 years // *Nat. Geosci.* 2012. V. 5. № 11. P. 808–812. <https://doi.org/10.1038/ngeo1589>
 44. **The impact** of North Atlantic–Arctic multidecadal variability on Northern Hemisphere surface air temperature / V.A. Semenov, M. Latif, D. Dommenges, N.S. Keenlyside, A. Strehz, T. Martin, W. Park // *J. Clim.* 2010. V. 23. № 21. P. 5668–5677. <https://doi.org/10.1175/2010JCLI3347.1>
 45. **Li J., Sun C., Jin F.-F.** NAO implicated as a predictor of Northern Hemisphere mean temperature multidecadal variability // *Geophys. Res. Lett.* 2013. V. 40. № 20. P. 5497–5502. <https://doi.org/10.1002/2013GL>
 46. **Cook E.R., D'Arrigo R.D., Briffa K.R.** A reconstruction of the North Atlantic oscillation using tree-ring chronology from North America and Europe // *The Holocene*. 1998. V. 8. № 1. P. 9–17. <https://doi.org/10.1191/095968398677793725>
 47. **Tracking** the Atlantic Multidecadal oscillation through the last 8,000 years / M.F. Knudsen, M.-S. Seidenkranz, V.H. Jacobsen, A. Kuipers // *Nat. Commun.* 2011. V. 2. № 178. P. 1–8. <https://doi.org/10.1038/ncomms1186>

48. **Hurrell J.W.** Decadal trends in the North Atlantic oscillation: regional temperatures and precipitation // *Science*. 1995. V. 269. № 5224. P. 676–679. <https://doi.org/10.1126/science.269.5224.676>
49. **Kosaka Y., Xie S.-P.** The tropical Pacific as a key pace-maker of the variable pace of global warming // *Nat. Geosci.* 2016. V. 9. № 9. P. 669–674. <https://doi.org/10.1038/ngeo2770>
50. **Mikushina O.V., Klimenko V.V., Dovgalyuk V.V.** History and forecast of solar activity // *Astron. Astrophys. Trans.* 1997. V. 12. № 4. P. 315–326. <https://doi.org/10.1080/10556799708232086>

Will the Energy Transition Be Able to Stop Global Warming and why Are Climatic Forecasts so Erroneous?

V. V. Klimenko^{a, c, *}, A. V. Klimenko^b, A. G. Tereshin^{a, c}, and O. V. Mikushina^{a, c}

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

^b National University of Science and Technology MISIS, Moscow, 119049 Russia

^c Energy Research Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117186 Russia

*e-mail: nilgpe@mpei.ru

Abstract—The current state of studies aimed at forecasting the development of world energy and its influence on the planet's atmosphere and climate is analyzed. Advantages of applying a historical-extrapolation approach to forecasting the development of world energy and other anthropogenic sources affecting the planet's atmosphere and climate, and also comprehensive consideration of natural climatic factors and natural variability features of the global climate are demonstrated. It is shown that a pattern adequately reflecting the change in the world's energy consumption and its carbon intensity was presented as a result of a genetic (based on the historical development regularities) world energy development forecast elaborated at the Moscow Power Engineering Institute (MPEI) more than 30 years ago. The cumulative carbon dioxide emission estimates for the period of 1990–2020 obtained using this approach are fully in line with the actual data following from the world energy statistics. By using this approach, it became possible to predict an essential transformation of the world energy balance (energy transition) at the beginning of the current century, which manifested itself in the growing role of carbon-free energy sources, primarily renewable ones. The predictions carried out in the 1990s using the MPEI's combined climatic model, which combines the principles of dynamic and statistical modeling of the global climatic system and takes into account the effect of natural climatic factors and the climatic system's internal features with using a genetic forecast of world energy consumption and carbon dioxide emission for the period of 1990–2020, showed an encouraging consistency with the data of observed global temperature variation dynamics. The prediction results show that the majority of the most radical energy consumption and corresponding carbon dioxide emission scenarios are in reality unfeasible, and the model predictions of global climatic changes performed according to these scenarios are also extremely unlikely. At the same time, it is stated that, to achieve the goals of preventing the average global temperature increase by more than 2°C in comparison with the preindustrial period, it is necessary, along with decreasing the consumption of fossil fuel, to develop, on significant scales, carbon dioxide absorption technologies, both biological (forest recreation, protection from forest fires, etc.) and geological (direct disposal).

Keywords: world energy, global climatic system, energy consumption amounts and structure, carbon dioxide emission and absorption, sulfur emissions, natural climatic factors, forecasts, scenarios, models